

УДК 621.3.07, 681.5.015

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ПРИВОДА ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Н.В. Мезенцев *, Г.В. Гейко *

** Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков, Украина
besitzer@i.ua*

Аннотация: Предлагается параметрическая идентификация тягового асинхронного привода дизель-поезда с использованием метода наименьших квадратов и генетического алгоритма. Приводится получение математической модели тягового привода, в которой исключены неподдающиеся прямому измерению величины.

Ключевые слова: параметрическая идентификация, тяговый асинхронный привод, метод наименьших квадратов, генетический алгоритм.

IDENTIFICATION PARAMETERS OF TRACTION INDUCTION MOTOR OF DIESEL TRAIN WITH USING GENETIC ALGORITHMS

N. V. Mezentsev *, G. V. Gejko *

** National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute",
Kharkov, Ukraine
besitzer@i.ua*

Abstract: Parametric identification traction asynchronous drive of diesel train using the least squares method and genetic algorithm is proposed. A mathematical model to obtain the traction drive, which excluded the direct measurement values intractable is present.

Keywords: parametric identification, asynchronous traction drive, the method of least squares, genetic algorithm.

Постановка проблемы и анализ литературы. В приводе дизель-поезда используются тяговые асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, определение части фазовых координат которых напрямую невозможно [1]. Поэтому для улучшения статической и динамической работы электродвигателей в системе управления необходимо решать задачу идентификации фазовых координат (это относится в большей степени к роторным переменным). Данная задача решается за счет построения различного рода наблюдателей, которые реализуются на базе известных математических моделей. Однако параметры привода, в частности сопротивления и индуктивности обмоток статора и ротора,

могут изменяться в процессе эксплуатации, что приводит к ошибкам в определении фазовых координат. В связи с этим, возникает задача идентификации параметров привода. При этом для идентификации может быть использован ряд методов, большинство из которых основано на использовании фильтров Калмана [2,3] и метода наименьших квадратов [4 – 8]. Так, в работе [4] по методу наименьших квадратов может быть получена часть параметров привода. Для этого необходимо иметь измеренные значения тока и напряжения статора, их производных первого и второго порядков. В то же время получение остальных параметров (в частности, сопротивления и индуктивности роторной обмотки и взаимной индуктивности) затруднено решением системы из двух нелинейных уравнений с тремя неизвестными. Однако, в связи с тем, что диапазон изменения данных параметров по отношению к номинальным значениям известен, то в работе предлагается выполнять поиск этих параметров на основе генетического алгоритма. В работе [9] предлагается осуществлять поиск всех параметров генетическим алгоритмом, однако это приводит к большим временным затратам.

Целью статьи является идентификация параметров тягового асинхронного привода на основе метода наименьших квадратов и генетического алгоритма.

Математическая модель тягового асинхронного привода при общеизвестных допущениях может быть представлена в неподвижной системе координат $(\alpha, \beta, 0)$ следующим образом:

$$\frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} U_{s\alpha} - \gamma i_{s\alpha} + \frac{\beta}{T_r} \Psi_{r\alpha} + p\beta\omega \Psi_{r\beta}; \quad (1)$$

$$\frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} U_{s\beta} - \gamma i_{s\beta} + \frac{\beta}{T_r} \Psi_{r\beta} + p\beta\omega \Psi_{r\alpha}; \quad (2)$$

$$\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\alpha} - \frac{\Psi_{r\alpha}}{T_r} - p\omega \Psi_{r\beta}; \quad (3)$$

$$\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\beta} - \frac{\Psi_{r\beta}}{T_r} - p\omega \Psi_{r\alpha}; \quad (4)$$

$$M = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{\sigma L_r} (\Psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} i_{s\alpha}); \quad (5)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (M - M_c), \quad (6)$$

где $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ – соответственно проекции тока статора на оси α и β ; t – время; $\sigma = 1 - k_s k_r = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$ – полный коэффициент рассеивания; L_m , L_s , L_r – соответственно взаимная индуктивность, индуктивность статора и ротора; $U_{s\alpha}$, $U_{s\beta}$ – соответственно проекции напряжения статора на оси α и β ; $\gamma = \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r^2}$; R_s , R_r – активные сопротивления статора и ротора; $\beta = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}$; $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ – постоянная времени ротора; p – число пар полюсов; $\Psi_{r\alpha}$, $\Psi_{r\beta}$ – соответственно проекции потокосцеплений ротора на оси α и β ; ω – частота вращения ротора; J – приведенный момент инерции состава; M – электромагнитный момент; $M_c = b_0 + b_1 \omega + b_2 \omega^2$ – момент сопротивления движению; где b_0 , b_1 , b_2 – коэффициенты, которые зависят от параметров дизель-поезда и условий движения.

Для выполнения идентификации параметров привода (R_s , L_s , R_r , L_r , L_m) по методу наименьших квадратов необходимо выполнить преобразование модели (1 – 6) к виду, в котором исключены неподдающиеся измерению величины потокосцепления ротора. Для этого объединив попарно уравнения (1) с (3) и (2) с (4), получим:

$$\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = \frac{1}{K_r} \left(U_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha} - \sigma L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} \right); \quad (7)$$

$$\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = \frac{1}{K_r} \left(U_{s\beta} - R_s i_{s\beta} - \sigma L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} \right). \quad (8)$$

Далее, продифференцировав обе части выражения (1) и (2), получим:

$$\frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2} = \frac{1}{\sigma L_s} \frac{dU_{s\alpha}}{dt} - \gamma \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \frac{\beta}{T_r} \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} + p\beta\omega \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} + p\beta \frac{d\omega}{dt} \Psi_{r\beta}; \quad (9)$$

$$\frac{d^2 i_{s\beta}}{dt^2} = \frac{1}{\sigma L_s} \frac{dU_{s\beta}}{dt} - \gamma \frac{di_{s\beta}}{dt} + \frac{\beta}{T_r} \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} + p\beta\omega \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} + p\beta \frac{d\omega}{dt} \Psi_{r\alpha}. \quad (10)$$

Подставив выражения (7) в (9), а (8) в (10) и выполнив соответствующие преобразования, с учетом того, что $\frac{d\omega}{dt} \approx 0$, имеем

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2} + p\omega \frac{di_{s\beta}}{dt} = K_1 i_{s\alpha} + K_2 U_{s\alpha} + K_3 p\omega i_{s\beta} + \\ + K_4 \left(\frac{dU_{s\alpha}}{dt} + p\omega U_{s\beta} \right) + K_5 \frac{di_{s\alpha}}{dt}; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_{s\beta}}{dt^2} + p\omega \frac{di_{s\alpha}}{dt} = K_1 i_{s\beta} + K_2 U_{s\beta} + K_3 p\omega i_{s\alpha} + \\ + K_4 \left(\frac{dU_{s\beta}}{dt} + p\omega U_{s\alpha} \right) + K_5 \frac{di_{s\beta}}{dt}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $K_1 = -\frac{R_s}{\sigma L_s T_r}$; $K_2 = \frac{1}{\sigma L_s T_r}$; $K_3 = -\frac{R_s}{\sigma L_s}$; $K_4 = \frac{1}{\sigma L_s}$;
 $K_5 = -\frac{(L_r R_s + L_s R_r)}{\sigma L_s L_r}$.

Таким образом, используя значения напряжения и тока (в осях α , β) в статорной обмотке двигателя их производных первого и второго порядка, а также частоты вращения ω , с помощью метода наименьших квадратов могут быть рассчитаны коэффициенты $K_1 - K_5$, на основе которых получаются основные параметры привода. Эти параметры определяются следующим образом:

$$R_s = -\frac{K_3}{K_4}, L_s = \frac{K_3 - K_5}{K_2}, T_r = \frac{K_4}{K_2}, \sigma = \frac{K_2}{K_4(K_3 - K_5)}.$$

Однако однозначно определить R_r , L_r , L_m через коэффициенты K нельзя. Определение данных параметров с учетом того, что диапазон их возможного изменения относительно паспортного значения известен, можно выполнить с помощью генетического алгоритма. При этом в качестве хромосомы выступали искомые параметры (R_r , L_r , L_m), каждый из которых кодировался 16 битами, как вещественное число из интервала $[0,5P_n - 2P_n]$, где P_n – паспортное значение параметра. Реальное значение соответствующих параметров получается по выражению (13).

$$A = a_1 + \frac{(a_2 - a_1)A^*}{2^{16} - 1}, \quad (13)$$

где A – вещественное значение одного из параметров (R_r, L_r, L_m); a_1, a_2 – соответственно нижний и верхний предел изменения параметров; A^* – целое значение параметра A .

Исходная популяция состояла из 150 хромосом и генерировалась случайным образом. Критерием качества (приспособленностью хромосомы) при поиске выступал модуль разности между значениями T_r и σ , полученными через коэффициенты K , и этими же значениями, найденными через параметры R_r, L_r, L_m .

Словесно алгоритм можно описать следующим образом: на первом этапе случайным образом генерируется исходная популяция бинарных хромосом. Затем определяется индекс приспособленности каждой хромосомы и по его значениям выполняется упорядочивание популяции. Вычисляется средняя по популяции приспособленность (J_S). Опираясь на нее, определяется вероятность (по выражению (14)), с которой каждая особь, обладающая приспособленностью меньше средней, может стать родителем.

$$p = \frac{1}{J_S}, \quad (14)$$

где J – приспособленность хромосомы; $S = \sum_i 1/J_i, J_i \leq J_S$.

При этом для каждого родителя в процессе генерации хромосомы потомка имеется две возможности: либо просто быть скопированным в следующее поколение, либо подвергнуться воздействию генетических операторов (кроссовера, мутации или инверсии). Каждый генетический оператор выполняется относительно определенного бита хромосомы, который выбирается случайным образом. Кроме того, несколько самых лучших хромосом из предыдущей популяции всегда сохраняются в новой популяции. Таким образом генерируется заданное число потомков. Поскольку потомки получены от лучших родителей, то их приспособленность может быть более высокой.

В результате математического моделирования предложенного метода идентификации ошибка определения параметров двигателя составила не более 14%, что сопоставимо с результатами, полученными в работе [8], где ошибка оценки параметров составляет 15–20%. Уменьшить величину ошибки возможно за счет увеличения времени поиска в генетическом алгоритме.

Выводы. С помощью метода наименьших квадратов и генетического алгоритма выполнена параметрическая идентификация тягового

асинхронного привода дизель-поезда, что позволяет с ее помощью построить наблюдатель для системы управления движением.

Список использованной литературы

1. **Дмитриенко В.Д.** Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / *В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Зако-воротный*. – Х.: Изд. центр "НТМТ", 2013. – 248 с.

2. **Бешта А.С.** Идентификация координат асинхронного двигателя в условиях дрейфа активных сопротивлений / *А.С. Бешта, А.В. Валахонцев, Е.Г. Худой* // *Электротехника та електроенергетика*. – 2005. – №2. – С. 52 – 64.

3. **Афанасьев К.С.** Идентификация скорости асинхронного электродвигателя лабораторного стенда с помощью фильтра Калмана и наблюдателя Люенбергера / *К.С. Афанасьев, А.С. Глазырин* // *Электротехнические комплексы и системы управления*. – 2012. – № 4. – С. 66 – 69.

4. **Ha I.-J.** An online identification method for both stator and rotor resistances of induction motor without rotational transducers / *I.-J. Ha, S.-H. Lee* // *IEEE Transactions on industrial electronics*. – 2000. – Vol. 47. – № 4. – P. 842–852.

5. **Duran M.J.** Induction-motor sensorless vector control with online parameter estimation and overcurrent protection / *M.J. Duran, J.L. Duran, F. Perez, J. Fernandez* // *IEEE Transactions on industrial electronics*. – 2006. – Vol. 53. – № 1. – P. 154–161.

6. **Зоркальцев В.И.** Метод наименьших квадратов: геометрические свойства, альтернативные подходы, приложения / *В.И. Зоркальцев*. – Новосибирск: ВО Наука. – 1995. – 220 с.

7. **Лоусон Ч.** Численное решение задач методом наименьших квадратов / *Ч. Лоусон, Р. Хенсон*. – М.: Наука. – 1986. – 232 с.

8. **Stephan J.** Real-time estimation of the parameters and fluxes of induction motors / *J. Stephan, M. Bodson, J. Chiasson* // *IEEE Transactions on industrial electronics*. – 1994. – Vol. 30. – № 3. – P. 746–759.

9. **Simonik P.** Estimation of induction machine electrical parameters based on genetic algorithms / *P. Simonik, P. Hudecek, P. Palacky* // *Progress in electromagnetics research symposium proceedings. Malaysia*. – 2012. – P. 999–1002.